

Техническая ошибка в расчёте срока службы полипропиленовых труб на примере систем горячего водоснабжения

Рецензия эксперта на статью получена
31.08.2026 [The expert review of the article
was received on August 31, 2026]

Полимерные трубы из рандом-сополимера полипропилена (PP-R) — один из самых востребованных материалов российского рынка для конструирования систем водоснабжения и отопления различного типа. Проектировщиков, строителей и частных покупателей привлекают относительная дешевизна полипропиленовых PP-R-труб, ассортимент фитингов, простота монтажа, устойчивость к коррозии и, конечно, обещанные производителями и официальными стандартами сроки службы до 50 лет. Однако и строители, и эксплуатирующие организации многоквартирных домов (МКД) часто сталкиваются с неприятной ситуацией: полипропиленовые PP-R-трубы, особенно в системах горячего водоснабжения (ГВС), без видимых причин разрушаются через 4–6 лет эксплуатации (рис. 1).

На тему «причины и факторы разрушения полипропиленовых PP-R-труб в системах ГВС» написано достаточно много технических статей в Российской Федерации и за рубежом [1, 2]. Авторы указанных публикаций (и многие другие) считают, что причины и факторы разрушения полипропиленовых PP-R-труб в системах ГВС связаны в первую очередь с воздействием на внутренний слой PP-R сильных окислителей, таких как хлор, хлориды, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) воды, растворённый кислород. В роли вторичных факторов указываются колебания рабочего давления и рабочей температуры воды, а также абстрактные технологические проблемы производства [2].

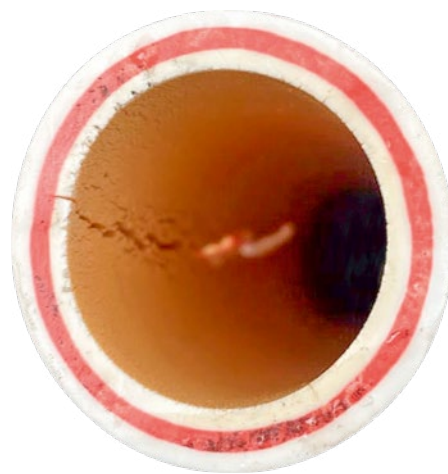


Рис. 1. Разрушение полипропиленовой (PP-R) трубы через четыре года эксплуатации в системе ГВС города Сыктывкар

К большому сожалению, причины и факторы разрушения полипропиленовых PP-R-труб в системах ГВС мало кто оценивает с точки зрения температурной стойкости PP-R-компаунда, из которого произведены трубы, установленные в этих аварийных системах, и способности исходного сырья длительное время выдерживать давление воды с максимальным значением рабочей температуры, заявленное в технической документации изготовителя.

Целью данной статьи является разработка механизма преобразования экспериментальных данных длительной прочности PP-R-компаундов, полученных по методике из ISO 9080:2012 [3], в трёхлинейные модели с учётом механизма термоокислительной деструкции полимерной матрицы полипропилена [4].

УДК 678.742.3:620.193. Научная специальность: 2.1.4.

Техническая ошибка в расчёте срока службы полипропиленовых труб на примере систем горячего водоснабжения

Антон Олегович Сушицкий, студент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Разрушение полипропиленовых (PP-R) труб в системах горячего водоснабжения (ГВС) многоквартирных домов при сравнительно небольших сроках эксплуатации является одной из актуальных проблем строительной и эксплуатационной практики. В ряде случаев данная проблема связана с использованием полипропиленовых PP-R-труб в системах ГВС с недопустимо высокими значениями рабочих давлений, ошибочно рассчитанных по эталонным графикам длительной прочности. Расчёт максимальных значений рабочего давления полипропиленовых труб в системах ГВС должен осуществляться по графикам гидростатической прочности PP-R-компаунда, из которого произведены трубы. В статье сделан анализ различий между эталонными графиками длительной прочности, представленными в ГОСТ 32415–2013, и фактическими графиками гидростатической прочности PP-R-компаунда, полученными по методике ISO 9080:2012, а также предложена модель адаптации экспериментальной зависимости гидростатической прочности PP-R-компаунда к трёхсегментному представлению, максимально учитывающему морфологическую структуру полимера при длительных нагрузках по температуре и давлению.

Ключевые слова: срок службы полипропиленовых PP-R-труб, эталонные графики длительной прочности, фактические графики гидростатической прочности PP-R-компаунда, трёхлинейная модель прогнозирования, деструкция полипропилена при длительных нагрузках по температуре и давлению.

UDC 678.742.3:620.193. Scientific specialty number: 2.1.4.

Technical error in calculating the service life of polypropylene pipes, using hot water supply systems as an example

Anton O. Sushitsky, student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

The failure of polypropylene (PP-R) pipes in hot water supply (HWS) systems of apartment buildings after relatively short service lives is a pressing issue in construction and operational practice. In some cases, this problem is associated with the use of polypropylene PP-R pipes in HWS systems with unacceptably high operating pressures, erroneously calculated using reference long-term strength curves. Calculation of the maximum operating pressures of polypropylene pipes in HWS systems should be based on the hydrostatic strength curves of the PP-R compound from which the pipes are made. The article analyzes the differences between the reference graphs of long-term strength presented in GOST 32415–2013 and the actual graphs of hydrostatic strength of PP-R compound obtained using the ISO 9080:2012 method. It also proposes a model for adapting the experimental dependence of the hydrostatic strength of PP-R compound to a three-segment representation that takes into account the morphological structure of the polymer under long-term loads due to temperature and pressure.

Key words: service life of polypropylene PP-R pipes, reference graphs of long-term strength, actual graphs of hydrostatic strength of PP-R compound, three-line forecasting model, degradation of polypropylene under prolonged loads by temperature and pressure.

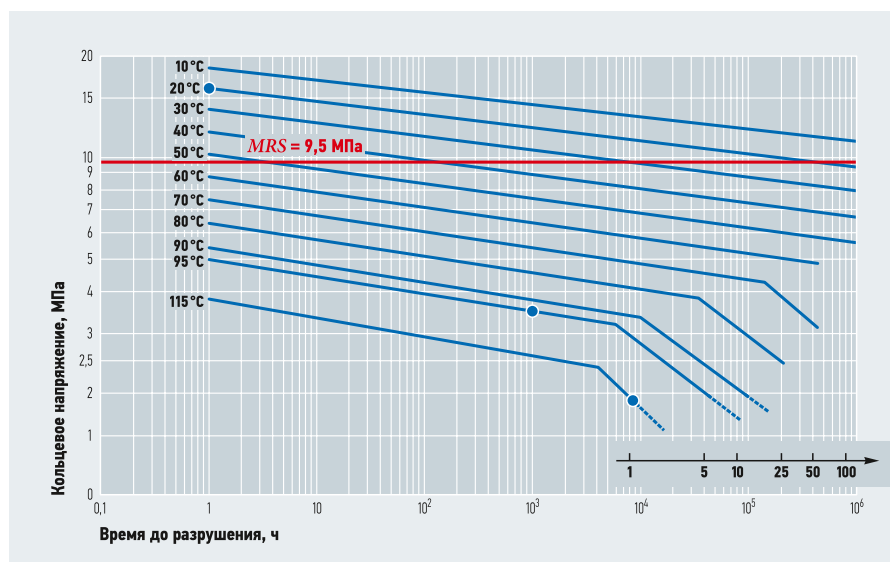


Рис. 2. Эталонные графики длительной прочности PP-R-материала из ГОСТ 32415 [5]

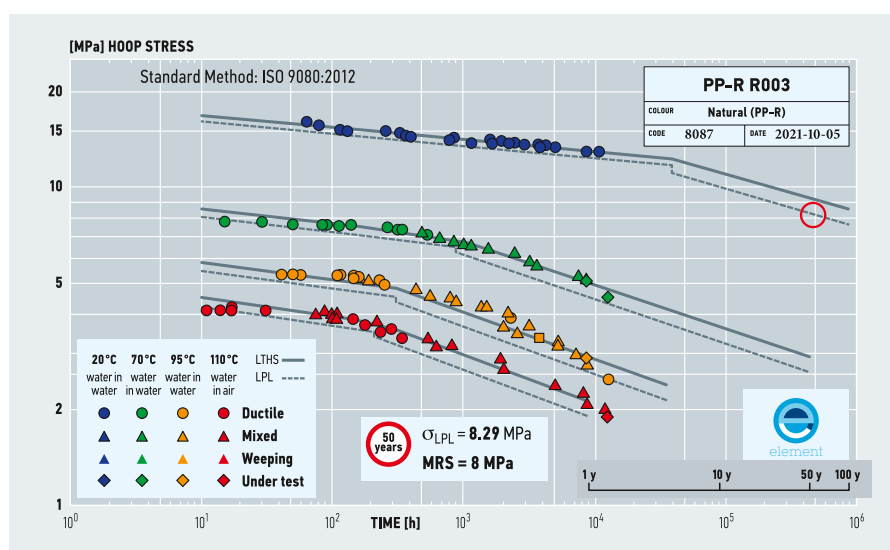


Рис. 3. Графики длительной прочности PP-R-компаунда R003 [6]

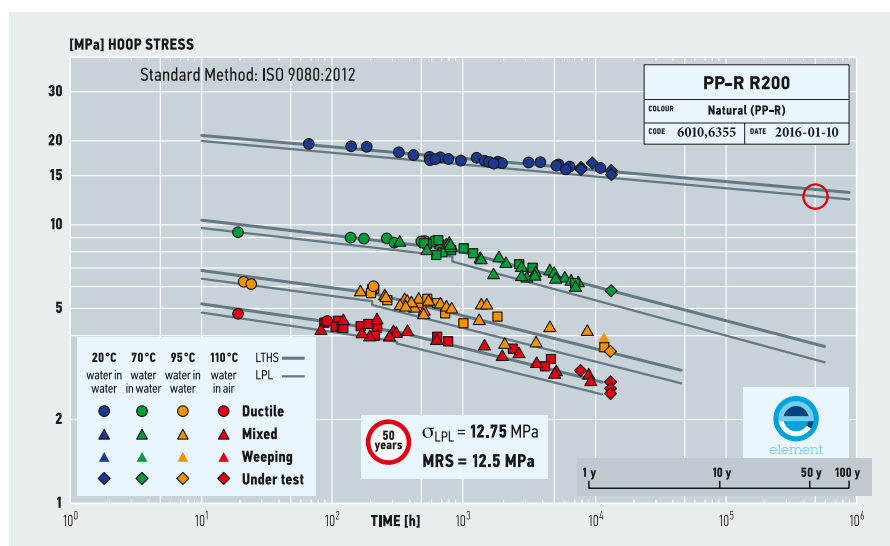


Рис. 4. Графики длительной прочности PP-R-компаунда R200 [7]

Величины σ_{LPL} для PP-R-компаундов R003 и R200 по методике ISO 9080 [3]

табл. 1

Температура t , °C	Время τ , лет	σ_{LPL} , МПа	
		R003	R200
20	50	8,29	12,72
70	50	2,63	3,33

* σ_{LPL} (Lower Confidence Limit of Predicted Hydrostatic Strength) — нижний доверительный предел (97,5%) прогнозируемой гидростатической прочности материала трубы при температуре t и времени τ (ГОСТ 32415 [5]).

Исходные данные

1. В сопроводительной документации производителей и поставщиков полипропиленовых труб для водоснабжения и отопления отсутствует информация о том, из PP-R-компаунда какого производителя сделана продукция.

2. ГОСТ 32415–2013 [5] — базовый документ, устанавливающий требования к геометрическим размерам полипропиленовых труб, характеристикам, параметрам и методам их контроля. В этом стандарте произведено структурирование возможных вариантов применения полимерных трубопроводов, в том числе полипропиленовых, в системах отопления и водоснабжения по классам эксплуатации (классы 1, 2, 4 и 5) с установлением граничных значений: рабочих $t_{\text{раб}}$, максимальных $t_{\text{макс}}$ и аварийных $t_{\text{авар}}$ температур. Дана методика определения допустимых значений рабочего давления по классам эксплуатации с учетом $t_{\text{раб}}$, $t_{\text{макс}}$ и $t_{\text{авар}}$ по эталонным графикам изменения длительной прочности базового PP-R-материала в интервале времени $\tau \in [10; 438\,000]$, то есть до 50 лет (рис. 2).

3. Фактические графики длительной гидростатической прочности двух компаундов random-сополимера полипропилена с нижним доверительным пределом прогнозируемой прочности* кольцевого напряжения σ_{LPL} [4]:

а) PP-R-компаунд R003 из протокола испытаний №8067 компании Element Materials Technology (Лондон, Великобритания) [6] (рис. 3, табл. 1);

б) PP-R-компаунд R200 из протокола испытаний №8067 компании Element Materials Technology [7] (рис. 4, табл. 1).

Обозначения на графиках согласно методике испытаний ISO 9080 [3] и комментариям в работе [4]:

- **Ductile** — разрушение образца под постоянной нагрузкой с хорошо заметной деформацией (пластичный характер);
- **Brittle** — хрупкое разрушение без заметной деформации исследуемой трубы с быстрым образованием трещины, вызванной действием внутреннего напряжения и температуры;
- **Mixed** — разрушение с незначительной деформацией испытуемого образца с комбинированным действием пластичного и хрупкого механизмов;
- **Weeping** — микроутечка или слабое протекание воды через стенку трубы;
- **Under Test** — неразрушенные образцы, оставшиеся после испытаний.

Особенности методики испытаний ISO 9080 [3], причины изломов графиков гидростатической прочности и их интерпретация детально расписаны в работе [4].

Исследование

1. Общая часть

В рамках выполнения технических условий ГОСТ 32415 [5] и разработки технической документации на продукцию производителям полипропиленовых труб требуется определить два параметра: максимальное значение рабочего давления по каждому классу эксплуатации и срок службы с учётом заданных температур $t_{\text{раб}}$, $t_{\text{макс}}$ и $t_{\text{авар}}$.

Анализ технических паспортов и каталогов показывает: производители полипропиленовых труб в России проводят расчёт рабочего давления и сроков службы исключительно по эталонным графикам длительной прочности из ГОСТ 32415 [5] (рис. 2). Вследствие этого возникает техническая ошибка в расчётах и полное подобие технических параметров и характеристик полипропиленовых труб всех производителей и поставщиков.

Особенно важно, что PP-R-компаундов, изменение длительной прочности которых со временем проходит по регрессионной модели эталонных графиков (рис. 2), в продаже на рынках России, Европы и Америки не существует. Эталонные графики — это обобщение различного рода лабораторных тестов и практических многолетних испытаний полипропиленовых труб в различных условиях.

Фактические графики длительной прочности PP-R-компаундов, из которых производятся полипропиленовые трубы для систем водоснабжения и отопления, отличаются от эталонных графиков длительной прочности базового PP-R-материала ГОСТ 32415 [5] как общим видом, так и численными значениями отражаемых параметров (табл. 2).

Для корректных расчётов рабочего давления и сроков службы полипропиленовых труб необходимо использовать данные фактических протоколов испытаний и графики длительной гидростатической прочности того PP-R-компаунда, из которого в действительности сделаны трубы. Однако сделать это без преобразо-

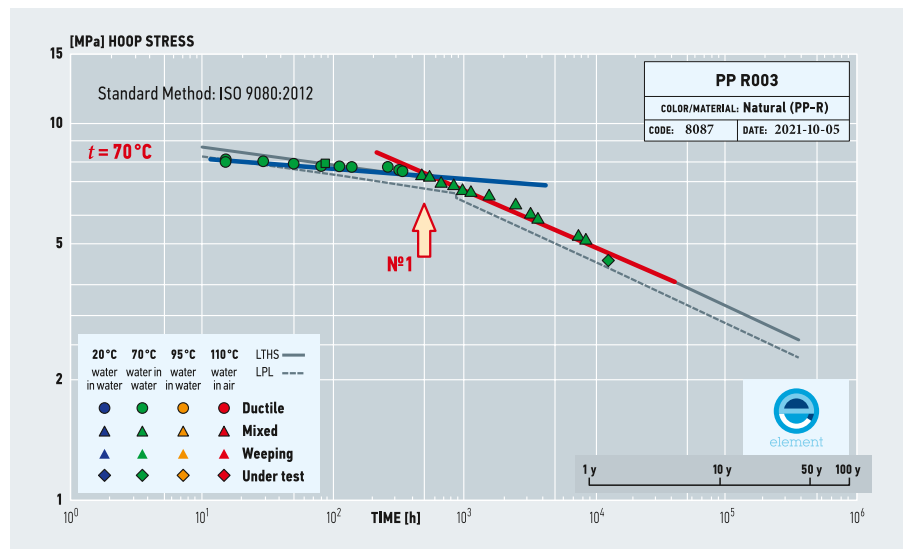


Рис. 5. График гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$)

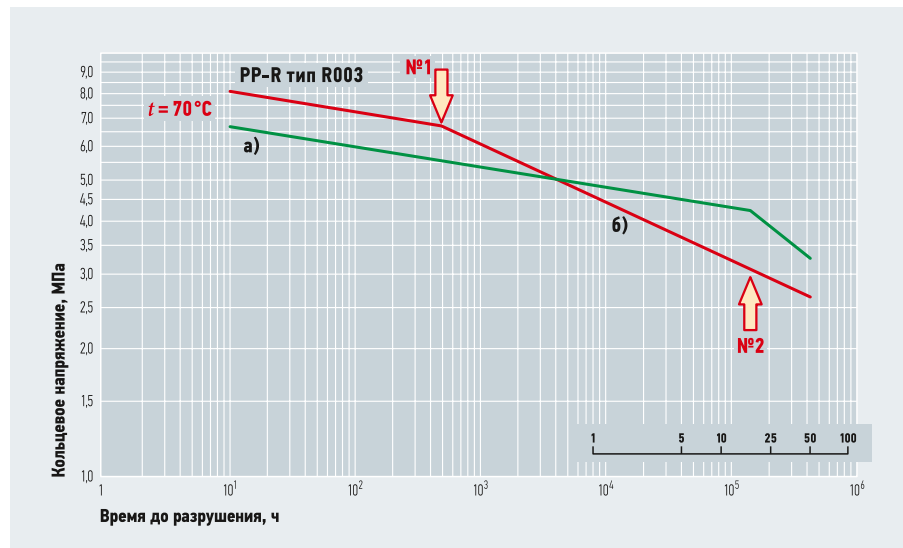


Рис. 6. Совмещение эталонного графика длительной прочности по ГОСТ 32415 [5] (а) с графиком гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 при $t = 70^\circ\text{C}$ (б)

вания графиков, представленных, например, на рис. 3 и 4, с дополнением семейства кривыми с температурами 40, 60, 80, 90, 95 и 100°C , проблематично.

В силу ограниченности объёма настоящей статьи рассмотрим только методику преобразования экспериментальных данных длительной гидростатической прочности PP-R-компаундов, полученных по методике ISO 9080 [3], в трёхлинейные формы представления, практическая зна-

чимость применения которых была обоснована в работе [4].

2. Численный анализ

Для проведения расчётов используем график изменения длительной прочности PP-R-компаунда R003 при температуре 70°C (максимально соответствующий второму классу эксплуатации — горячее водоснабжение), выделим его из общего семейства кривых (рис. 3) и определим расположение колен излома на временной оси (рис. 5).

Согласно методике ISO 9080 [3], изменение типа разрушений образцов труб в ходе испытаний меняет наклон графика гидростатической прочности и образует колено излома, что отражено на рис. 5 (колено излома при $t_{k1} = 500$ ч).

Для оценки подобия эталонного графика длительной прочности ГОСТ 32415 [5] графику гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$) сделаем их графическое совмещение по нижнему доверительному пределу σ_{LPL} (рис. 6).

Сопоставление параметров эталонных графиков длительной прочности PP-R

табл. 2

Наименование параметра	Данные эталонного графика длительной прочности PP-R по ГОСТ 32415 [5]	Данные графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 [6]	Данные графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R200 [7]
MRS, МПа	9,5	8,0	12,5
σ_{LPL} (график $+70^\circ\text{C}$), длительность испытаний 10 ч, МПа	6,75	8,05	9,90
σ_{LPL} (график $+70^\circ\text{C}$), длительность испытаний 500 ч, МПа	5,62	6,65	8,00
σ_{LPL} (график $+20^\circ\text{C}$), прогнозируемый срок службы 50 лет	9,85	8,29	12,72
σ_{LPL} (график $+70^\circ\text{C}$), прогнозируемый срок службы 50 лет	3,30	2,63	3,33

Из сопоставления вида графиков, представленных на рис. 6, следует:

1. В промежутке времени $\tau \in [10; 500]$ графики «а» и «б» параллельны, характер разрушения образцов труб соответствует типу Ductile и обусловлен ползучестью материала под напряжением [8], структура полимерной матрицы полипропилена, состав и количество антиоксидантов противостоят термоокислительной деградации.

2. В точке $\tau_{K1} = 500$ ч проявляется проблема с гидростатической прочностью PP-R-компаунда R003 — вследствие неудачной морфологии, кристалличности, распределения фаз полимерной матрицы или быстрого истощения антиоксидантов начинает проявляться термоокислительная деструкция [4, 9, 10], характер разрушения образцов меняется и становится Mixed. Эталонный график длительной прочности для $t = 70^\circ\text{C}$ по ГОСТ 32415 [5] на интервале времени наблюдения от 10 до 150 000 ч имеет вид прямой с наклоном, соответствующим типу Ductile. Это

Парадоксальная ситуация: PP-R-компаунд R003 имеет явные проблемы со стойкостью к термической деструкции полимерной матрицы, что подтверждается фактом образования колена излома графика гидростатической прочности на промежутке времени испытаний всего 500 ч, но не имеет излома графика, соответствующего хрупкому типу разрушения Brittle, который задаётся методологией эталонного графика длительной прочности

обстоятельство показывает наличие существенных отличий характеристик эталонного PP-R-материала от исследуемого PP-R-компаунда R003, которые будут влиять как на срок службы полипропиленовых труб, так и на величины допустимых значений рабочих давлений.

3. Излом эталонного графика длительной прочности по ГОСТ 32415 [5] ($t = 70^\circ\text{C}$) происходит в точке времени приблизительно $\tau = 150\,000$ ч. Угол наклона рассматриваемого графика при $\tau > 150\,000$ ч, как показано на рис. 5, больше участка Mixed графика «б» и согласно классификации ISO 9080 [3] соответствует хрупкому типу разрушения Brittle.

Парадоксальная ситуация: PP-R-компаунд R003 имеет явные проблемы со стойкостью к термической деструкции полимер-

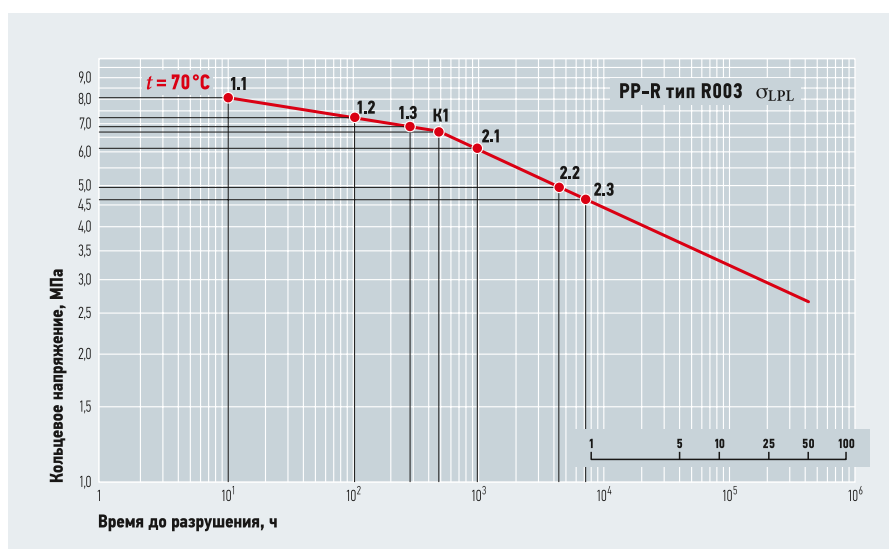


Рис. 7. Положение контрольных точек на графике гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$)

ной матрицы, что подтверждается фактом образования колена излома графика гидростатической прочности на промежутке времени испытаний всего 500 ч, но не имеет излома графика, соответствующего хрупкому типу разрушения Brittle, который задаётся методологией эталонного графика длительной прочности.

4. Отсутствие второго колена излома в области экстраполяции на графике гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$), соответствующего переходу к хрупкому механизму разрушения Brittle, объясняется просто. При обработке результатов испытаний по методике ISO 9080 [3] используется линейная регрессионная модель, которая аппроксимирует зависимость двумя участками и не предусматривает выделение третьего сегмента. Наличие колена излома при $\tau = 500$ ч подтверждено экспериментальными данными, и его игнорировать нельзя, показать второе колено излома не даёт математическая модель ISO 9080 [3]. Ситуация тупиковая.

Базовая основа представления гидростатической прочности PP-R-материалов во времени трёхлинейными (многосегментными) зависимостями дана в работе [11], которая представляет процесс тер-

моокислительной деструкции полипропилена тремя стадиями: индукционным периодом, стадией ускоренного окисления и стадией деградации. В более ранней работе [12] на основании анализа причин и факторов кинетики разрушения обоснована целесообразность использования многосегментных моделей для описания зависимости длительной прочности полимеров от времени. С учётом сформулированных предпосылок изменение гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 представим трёхлинейной моделью методом экстраполяции.

Для определения местоположения второго колена излома и построения трёхлинейной модели изменения гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$) используем кривую «б» графика рис. 6 и зададим на ней контрольные точки:

- три на первом участке (1.1, 1.2, 1.3);
- непосредственно колено излома K1;
- три точки на втором участке (2.1, 2.2, 2.3).

Положение контрольных точек на графике изменения гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$) показано на рис. 7. Описание контрольных точек представлено в табл. 3.

Данные контрольных точек графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$)

табл. 3

Участок	Номер контрольной точки	Время испытаний τ , ч	Кольцевое напряжение σ , МПа
Ductile	1.1	10	8,05
	1.2	100	7,30
	1.3	300	6,92
Колено излома	K1	500	6,81
Mixed	2.1	1000	6,15
	2.2	4500	4,92
	2.3	7000	4,60

Для преобразования графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 в трёхсегментную зависимость используем многофакторную регрессионную модель длительной гидростатической прочности логарифмического вида [3, 13]:

$$\log_{10} \sigma = A + B \log_{10} \tau + Ct + Dt \log_{10} \tau, \quad (1)$$

где τ — время до разрушения, ч; σ — напряжение, МПа; t — температура, °C; A , B , C и D — эмпирические коэффициенты регрессии полимера, то есть A — свободный коэффициент регрессии, определяющий значение функции регрессии при $\log_{10} \tau = 0$ при базовых значениях факторов ($\tau = 1$, $t = t_n$, где t_n — температура, выбранная в качестве базовой точки отсчёта при построении модели), B — скорость деградации материала с ростом времени эксплуатации (наклон логарифмической зависимости), C — параметр прямого температурного воздействия на прочность, D — изменение кинетики разрушения при одновременном увеличении τ и t (изменение B в зависимости от температуры).

Перегруппируем члены формулы (1) и получим:

$$\log_{10} \sigma = (A + Ct) + (B + Dt) \log_{10} \tau, \quad (2)$$

Введём коэффициенты:

$$a = A + Ct; b = B + Dt, \quad (3)$$

где a — параметр, определяющий уровень зависимости «напряжение — время» при заданной температуре (логарифм напряжения при $\tau = 1$ ч); b — скорость изменения зависимости «напряжение — время» в логарифмических координатах, характеризующая изменение длительной прочности во времени при данной температуре.

Введённые коэффициенты позволяют преобразовать уравнение (2) к виду:

$$\log_{10} \sigma = a + b \log_{10} \tau. \quad (4)$$

Для материалов, разрушение образцов которых с течением времени обуславливается только ползучестью материала, модель аппроксимации может описываться одной линией, соответствующей выражению (4). Трёхлинейная модель регрессии должна описываться системой линейных уравнений:

$$\log_{10} \sigma(t) = \begin{cases} a_1 + b_1 \log_{10} \tau, \tau \leq \tau_{k1} \\ a_2 + b_2 \log_{10} \tau, \tau_{k1} < \tau \leq \tau_{k2}, \\ a_3 + b_3 \log_{10} \tau, \tau \geq \tau_{k2} \end{cases} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что регрессионные модели по ISO 9080 [3] делаются в логарифмических координатах, оси зададим как:

$$x = \log_{10} \tau; y = \log_{10} \sigma. \quad (6)$$



Для линейного характера регрессионной зависимости полимерного материала связь координат и коэффициентов можно представить в следующем виде:

$$y = a + bx. \quad (7)$$

Используя выражения (6), преобразуем данные контрольных точек табл. 3 графика длительной гидростатической прочности PP-R-компаунда R003.

Результат выполненного преобразования представлен в табл. 4.

Для нахождения параметров математической модели (5) регрессионный анализ проведём с использованием метода наименьших квадратов [14]:

$$\begin{aligned} a &= \bar{y} - b \bar{x}; \\ b &= \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

где n — количество экспериментальных данных.

Подставляем исходные данные и рассчитываем регрессионный участок Ductile графика длительной гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 при температуре $t = 70^\circ\text{C}$ (промежуточные вычисления пропускаем):

$$\begin{aligned} \sum x &= 5,477; \sum y = 2,609; \\ \sum x^2 &= 11,139; \sum xy = 4,714. \end{aligned}$$

Наклон регрессионного графика на участке Ductile:

$$b_1 = -0,042.$$

Усреднённые значения $\bar{x}$ и $\bar{y}$ выражения (8):

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 1,826; \bar{y} = 0,870; \\ a_1 &= 0,870 - (0,042 \times 1,826) = 0,947. \end{aligned}$$

Подставляем полученные значения в уравнение (7):

$$y_1 = 0,947 - 0,0421x.$$

Аналогичным образом рассчитываем участок регрессии Mixed:

$$\begin{aligned} \sum x &= 10,498; \sum y = 2,144; \\ \sum x^2 &= 37,13; \sum xy = 7,445; \\ b_2 &= -0,148; \\ \bar{x} &= 3,499; \bar{y} = 0,715; \\ a_1 &= 1,232; \\ y_2 &= 1,232 - 0,148x. \end{aligned} \quad (9)$$

Используя полученные данные, проверим расположение точки пересечения x_k по оси времени между участками графика Ductile и Mixed посредством выражения:

$$x_k = \frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2}. \quad (10)$$

Подставляем значения данных и проводим вычисление:

$$x_k^* = 2,69; \tau_k^* = 10^{2,69} = 490 \text{ ч.}$$

Данные контрольных точек на графике гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$) в координатных осях

табл. 4

Участок	№ контрольной точки	Время испытаний τ , часы	Кольцевое напряжение σ , МПа	Координатная ось x	Координатная ось y
Ductile	1.1	10	8,05	1,0	0,906
	1.2	100	7,3	2,0	0,863
	1.3	300	6,92	2,447	0,84
Колено излома	K1	500	6,81	Точку пересечения двух участков графика определим расчётом	
Mixed	2.1	1000	6,15	3,0	0,789
	2.2	4500	4,92	3,653	0,692
	2.3	7000	4,6	3,845	0,663

Расчётная точка τ_k^* практически соответствует расположению колена излома $\tau_k = 500$ ч на графике, что является косвенным подтверждением корректности используемых данных и общей методики расчёта.

На следующем этапе определим расположение второго колена излома на графике длительной гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 при $t = 70^\circ\text{C}$ с учётом следующих утверждений:

1. Второй излом графика связан с переходом от смешанного (Mixed) к хрупкому механизму разрушения Brittle, обусловленным термоактивированными процессами старения материала, исчерпанием ресурса антиоксидантов и снижением способности полимерной матрицы к пластической деформации.

2. Анализ экспериментальных данных, представленных в отраслевых исследованиях и технической литературе [15], показывает, что при температуре 70°C переход к механизму разрушения от Mixed к Brittle, как правило, наблюдается в области кольцевых напряжений порядка 3,5–4,5 МПа. Указанный диапазон соответствует зоне, в которой происходит заметное снижение пластичности материала и изменение наклона кривой длительной прочности. Это подтверждается в том числе эталонным графиком длительной прочности PP-R-материала при $t = 70^\circ\text{C}$.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при температуре 70°C переход к механизму разрушения от Mixed к Brittle наблюдается в области кольцевых напряжений порядка 3,5–4,5 МПа. Указанный диапазон соответствует зоне, в которой происходит заметное снижение пластичности материала и изменение наклона кривой длительной прочности

С учётом сказанного, а также из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных данных, значение кольцевого напряжения второго колена излома примем $\sigma_{k2} = 4,0$ МПа. Тогда:

$$y_{k2} = \log_{10} \sigma_{k2} = 0,602.$$

Подставим значение y_{k2} в выражение (9), получим $0,602 = 1,232 - 0,148x$, отсюда: $x = 4,26$.

Расположение точки второго колена излома на временной оси:

$$\tau_{k2} = 10^{4,26} = 18\,197 \text{ ч.}$$

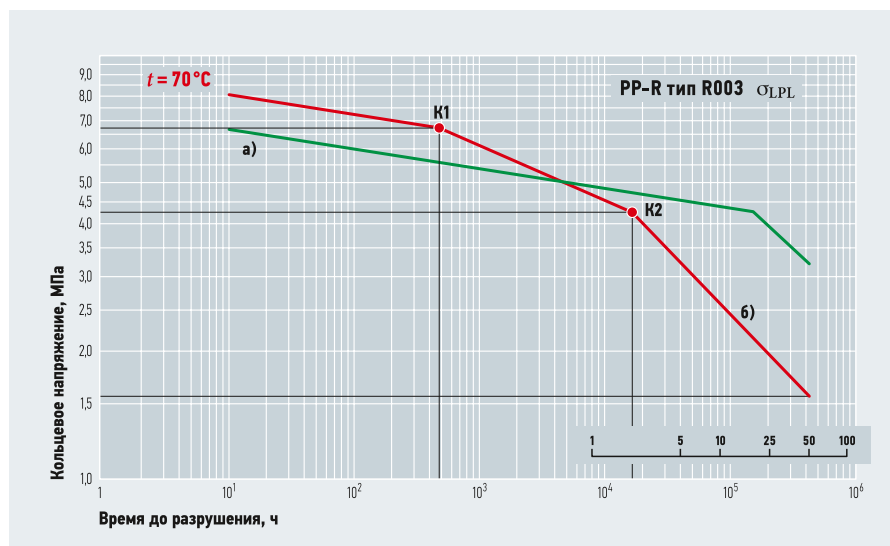


Рис. 8. Эталонный график длительной прочности (а) по ГОСТ 32415 [5] ($t = 70^\circ\text{C}$) и реструктурированный график гидростатической прочности (б) PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$)

Общее уравнение третьего участка графика длительной гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$), построенного от точки второго колена излома, имеет вид:

$$y_3 = y_{k2} + b_3(x_3 - x_{k2}), \quad (11)$$

где x_{k2} и y_{k2} — координаты второго излома; b_3 — наклон третьего участка; x_3 — текущая переменная ($\log t$).

Уравнение (11) представляет собой запись линейной зависимости [14], полученной из общего уравнения $y = a + bx$ с учётом условия непрерывности графика в точке излома.

Материалы ISO 9080 [3] и вид эталонных графиков PP-R-материалов, а также результаты практических испытаний [15] однозначно показывают, что участок хрупкого разрушения графика гидростатической прочности PP-R-компаунда имеет наклон больший, чем у участка Mixed. Это даёт основание сделать оценку коэффициента наклона графика b_2 на участке Mixed через соотношение вида $b_2 = \Delta y / \Delta x$ для контрольных точек 1000 и 7000 ч.

Подставляем исходные данные и рассчитываем:

$$b_2 = \frac{0,663 - 0,789}{3,845 - 3,0} = -0,15.$$

По сформулированному условию b_3 должно быть меньше b_2 . В инженерной практике b_3 выбирают из диапазона значений $b_3 \approx -0,3 \dots -0,35$.

Для дальнейших расчётов примем $b_3 = -0,3$. Подставим известные значения данных в выражение (11), получим:

$$y_3 = 0,602 - 0,3(x - 4,26) = 1,88 - 0,3x.$$

На заключительном этапе определим величину категоризованной требуемой

прочности (Common Reference Strength, CRS) [17] для температуры $t = 70^\circ\text{C}$ и срока службы $\tau = 50$ лет. В этом случае $\tau = 438\,000$ ч, $x = 5,64$, а y_3 будет равен:

$$y_3 = 1,880 - 0,30 \times 5,64 = 1,880 - 1,692 = 0,188.$$

Соответственно:

$$\sigma_{k2} = 10^{0,188} = 1,54 \text{ МПа.}$$

3. Итерационное уточнение параметров модели

На этапе определения положения второго колена излома на графике гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 было принято априорное значение кольцевого напряжения $\sigma_{k2} = 4,0$ МПа, соответствующее области перехода к хрупкому механизму разрушения.

В результате решения уравнения регрессии второго участка получено значение времени $\tau_{k2} = 18\,197$ ч. При подстановке данного значения времени в уравнение регрессии второго участка получено уточнённое значение кольцевого напряжения $\sigma_{k2} = 4,25$ МПа.

Таким образом, после итерационного уточнения параметры точки второго колена излома принимают вид: $\tau_{k2} = 18\,197$ ч, $\sigma_{k2} = 4,25$ МПа.

4. Итоговая часть

Полученные значения расчётных величин используем для преобразования графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 ($t = 70^\circ\text{C}$), показанного на рис. 5. В итоге получаем реструктурированный график, представленный на рис. 8б.

Реструктурированный трёхлинейный график гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 имеет существенно большее подобие эталонному графику длительной прочности ГОСТ 32415 [5].

Инженерный экспресс-расчёт срока службы по графику рис. 8б, например, полипропиленовой трубы DN40×6,7 SDR6 в «идеализированной» системе ГВС ($t_{\text{раб}} = t_{\text{макс}} = t_{\text{авар}} = 70^\circ\text{C}$) при рабочем давлении 0,8 МПа с кольцевым напряжением:

$$\sigma = 0,8 \times \frac{40 - 6,7}{2 \times 6,7} = 1,99 \text{ МПа}$$

с коэффициентом запаса прочности при $C_1 = 1,5$ (по нормам ГОСТ 32415 [5]) при $t_{\text{раб}} = 70^\circ\text{C}$ даёт расчётный срок службы 6,5 лет.

Принимая во внимание факт наличия в воде реальной системы ГВС сильных окислителей, которые никак не учитываются методикой испытаний ISO 9080 [3] и графиком длительной гидростатической прочности, реальный срок службы полипропиленовых труб из PP-R-компаунда R003 действительно может находиться в пределах 4,5–5 лет.

В этом случае разрушение полипропиленовой трубы, представленной на рис. 1, если она сделана из PP-R-компаунда R003, вполне понятно и объяснимо.

Выводы

1. Детальный анализ протоколов испытаний PP-R-компаундов R003 и R200 [6, 7] показывает, что фактические кривые длительной гидростатической прочности материала существенно отличаются от типовых (эталонных) зависимостей, приведённых в ГОСТ 32415–2013 [5], которые ошибочно используются для расчётов и декларирования сроков службы указанного типа труб в системах отопления и водоснабжения.

В настоящей работе обосновано приращение и создана трёхлинейная модель прогнозирования гидростатической прочности реального PP-R-компаунда, позволяющая более адекватно описывать поведение материала в области длительных нагрузок, особенно при наличии первого колена излома в диапазоне лабораторных испытаний.

Новизна работы заключается в разработке методического подхода к построению трёхлинейной модели длительной гидростатической прочности PP-R-компаундов на основе экспериментальных данных, полученных по методике, представленной в ISO 9080:2012 [3].

В отличие от традиционного двухлинейного представления, предложенный подход учитывает наличие дополнительного участка, связанного с изменением механизма разрушения материала, и позволяет повысить адекватность механизма поведения материала в области длительных нагрузок.



2. ГОСТ 32415 [5] является базовым нормативным документом, аккумулирующим требования к характеристикам и методам испытаний полипропиленовых трубопроводов. К сожалению, данный стандарт ориентирован преимущественно на оценку длительной прочности материалов в условиях, регламентированных методикой ISO 9080 [3], и в ограниченной степени учитывает: характер изменения гидростатической прочности во времени современных PP-R-компаундов, а также влияние эксплуатационных факторов, связанных с термоокислительным старением материалов.

В международной практике (страны Европы и США) наблюдается тенденция к расширению требований к испытаниям полимерных труб, включая оценку стой-

кости материалов к воздействию дезинфицирующих реагентов (свободного хлора и хлораминов), а также к термоокислительному старению [17].

Результаты испытаний PP-R-компаундов в условиях воздействия окислительных сред показывают, что при параметрах воды, даже соответствующих нормам СанПиН, появляется ускоренное снижение длительной прочности материала по сравнению с прогнозами, полученными по методике ГОСТ 32415 [5].

Указанные особенности следует учитывать при проектировании систем горячего водоснабжения, особенно в многоэтажном строительстве, и принимать как факт, что сроки службы полипропиленовых PP-R-труб продолжительностью 50 лет в реальных системах маловероятны. ●

1. Маркосов С.А., Юдин Р.В. Возможные проблемы использования полипропиленовых труб в закрытых системах ГВС высотных МКД // АВОК, 2023. №4. С. 42–45.
2. Ильбалиева Н.З., Муканов Р.В., Муканова О.Р. Исследование характерных причин разрушения полипропиленовых трубопроводов системы отопления при производственном браке / Проблемы техносферы и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: Сб. мат. I Межд. науч. конф. (16.02.2023, г. Макеевка). — Макеевка: ДонНACA, 2023. С. 50–52.
3. ISO 9080:2012. Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Edition 2. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. 2012. 44 p.
4. Сушицкий А.О. Термоокислительная деструкция — основной фактор сокращения сроков службы полипропиленовых труб // Журнал СОК, 2026. №5. С. 18–23.
5. ГОСТ 32415–2013. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия (с Попр.) / Дата введ.: 01.01.2015.
6. Element test report P-21-221-V2, 2021-10-05: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade SIBEX PP R003 EX-1. Element Materials Technology. London, UK. October 5, 2021.
7. Element test report P-16/07-V2, 2016-01-11: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade Topilene R200P. Element Materials Technology. London, UK. January 11, 2016.
8. Порчидзе А.Д. Ползучесть как важнейшее эксплуатационное свойство полимерных материалов // World Science, 2018. Т. 4. №6. С. 54–56.
9. Заворзая Я.Я., Бочкарев В.В., Лопатинский В.Я., Гулиева Л.А. Деструкция и стабилизация полипропилена (обзор) // Пластические массы, 1990. №3. С. 29–32.
10. Plastic additives: Your key components for reliable performance in the building & construction industry [Электр. ресурс]. BASF Lampertheim GmbH. Lampertheim, Germany. 2021. Режим доступа: download.basf.com. Дата обрац.: 05.02.2026.
11. Gugumus F. Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state — 6. Kinetics of thermal oxidation of polypropylene. Polymer Degradation and Stability. 1998. Vol. 62. No. 2. Pp. 235–243.
12. Деюн Е.В., Манелис Г.Б., Полианчик Е.Б., Смирнов Л.П. Кинетические модели при прогнозировании долговечности полимерных материалов // Успехи химии, 1980. Т. 49. №8. С. 1574–1593.
13. ГОСТ ISO 9080–2023. Трубопроводы и воздуховоды из пластмасс. Определение длительной гидростатической прочности термопластов на образцах в форме труб методом экстраполяции / Дата введ.: 01.12.2024.
14. Макеева О.В., Воронова Д.В. Метод наименьших квадратов как инструмент изучения зависимости между величинами в физическом эксперименте // Наука Online, 2021. №1. С. 102–115.
15. PPI TR-3/2018. Policies and procedures for developing hydrostatic design basis (HDB), pressure design basis (PDB), strength design basis (SDB), and minimum required strength (MRS) ratings for thermoplastic piping materials or pipe. Plastics Pipe Institute, Inc. Irving, TX, USA. 2018. 52 p.
16. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1. — М.: Наука, 1981. 480 с.
17. ASTM F2389–24a. Standard specification for pressure-rated polypropylene (PP) piping systems. American Society for Testing and Materials (ASTM International). West Conshohocken, PA, USA. 2024. 11 p.

References — see page 78.

HEATING, HOT WATER AND GAS SUPPLY

Technical error in calculating the service life of polypropylene pipes, using hot water supply systems as an example. Pp. 44–50.

Anton O. Sushitsky, student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. S.A. Markosov, R.V. Yudin. *Vozmozhnye problemy ispol'zovaniya polipropilenovykh trub v zakrytykh sistemakh GVS vysohtnykh MKD* [Potential problems of using polypropylene pipes in closed hot water supply systems of high-rise apartment buildings]. *AVOK* [Journal of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)]. 2023. No. 4. Pp. 42–45. [In Russian]
2. N.Z. Il'balieva, R.V. Mukanov, O.R. Mukanova. *Issledovanie kharakternykh prichin razrusheniya polipropilenovykh truboprovodov sistemy otopleniya pri proizvodstvennom brake* [Study of typical causes of failure of polypropylene heating pipes due to manufacturing defects]. *Problemy tekhnosfernoj i ekologicheskoy bezopasnosti v promyshlennosti, stroitel'stve i gorodskom khozjaystve: Sb. mat. 1 Mezhd. nauch. konf.* [Problems of technosphere and environmental safety in industry, construction, and urban economy: Coll. vol. of the I International Scientific Conference]. February 16, 2023. Makeevka. DonNASA [Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)]. 2023. Pp. 50–52. [In Russian]
3. ISO 9080:2012. *Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation*. Edition 2. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. 2012. 44 p.
4. A.O. Sushitsky. *Termookislitel'naya destruktsiya — osnovnoj faktor sokrashcheniya strokov sluzhby polipropilenovykh trub* [Thermal-oxidative degradation is the main factor in reducing the service life of polypropylene pipes]. *Zhurnal Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Air Conditioning and Ventilation]. 2026. No. 5. Pp. 18–23. [In Russian]
5. GOST 32415–2013 [The State Industry Standard of Russia No. 32415–2013]. *Truby napornye iz termoplastov i soedinitel'nye detali k nim dlya sistem vodosnabzheniya i otopleniya. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s Popr.)* [Thermoplastic pressure pipes and fittings for water supply and heating systems. General specifications (with Amendment)]. Date of impl.: January 1, 2015. [In Russian]
6. Element test report P-21-221-V2, 2021-10-05: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade SIBEX PP R003 EX-1. Element Materials Technology. London, UK. October 5, 2021.
7. Element test report P-16/07-V2, 2016-01-11: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade Topilene R200P. Element Materials Technology. London, UK. January 11, 2016.
8. A.D. Porchkhidze. *Polzuchest' kak vazhnejshee ekspluatatsionnoe svojstvo polimernykh materialov* [Creep as the most important operational property of polymeric materials]. *World Science*. 2018. Vol. 4. No. 6. Pp. 54–56. [In Russian]
9. Ya.Ya. Zavorzaeva, V.V. Bochkaryov, V.Ya. Lopatinsky, L.A. Gulieva. *Destruktsiya i stabilizatsiya polipropilena (obzor)* [Destruction and stabilization of polypropylene (review)]. *Plasticheskie massy* ["Plastic masses" Magazine]. 1990. No. 3. Pp. 29–32. [In Russian]
10. Plastic additives: Your key components for reliable performance in the building & construction industry. BASF Lampertheim GmbH. Lampertheim, Germany. 2021. Web-source: download.basf.com. Access date: February 5, 2026.
11. F. Gugumus. *Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state — 6. Kinetics of thermal oxidation of polypropylene*. *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 62. No. 2. Pp. 235–243.
12. E.V. Deyun, G.B. Manelis, E.B. Polianchik, L.P. Smirnov. *Kineticheskie modeli pri prognizirovanii dolgovechnosti polimernykh materialov* [Kinetic models for predicting the durability of polymeric materials]. *Uspekhi khimii* ["Advances in Chemistry" Magazine]. 1980. Vol. 49. No. 8. Pp. 1574–1593. [In Russian]
13. GOST ISO 9080–2023 [The State Industry Standard of Russia (ISO) No. 9080–2023]. *Plastmassovye truboprovodnye sistemy. Opredelenie dlitel'noj gidrostaticheskoy prochnosti termoplastov metodom ekstrakpolyatsii (s popr.)* [Plastics piping systems. Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics by the extrapolation method (with Amendments)]. Date of impl.: December 1, 2024. [In Russian]
14. O.V. Makeeva, D.V. Voronova. *Metod naimenshih kvadratov kak instrument izucheniya zavisimosti mezhdu velichinami v fizicheskom eksperimente* [The least squares method as a tool for studying the relationship between quantities in a physical experiment]. *Nauka Online* ["Science Online" Magazine]. 2021. No. 1. Pp. 102–115. [In Russian]
15. PPI TR-3/2018 (Plastics Pipe Institute Technical Report No. 3/2018). Policies and procedures for developing hydrostatic design basis (HDB), pressure design basis (PDB), strength design basis (SDB), and minimum required strength (MRS) ratings for thermoplastic piping materials or pipe. Plastics Pipe Institute, Inc. Irving, TX, USA. 2018. 52 p.
16. V.I. Smirnov. *Kurs vysshey matematiki* [Course in higher mathematics]. Vol. 1. Moscow. Nauka ["Science" Publisher]. 1981. 480 p. [In Russian]
17. ASTM F2389–24a. *Standard specification for pressure-rated polypropylene (PP) piping systems*. American Society for Testing and Materials (ASTM International). West Conshohocken, PA, USA. 2024. 11 p.

AIR CONDITIONING AND VENTILATION

Neural network method for estimating room occupancy to reduce the energy consumption of ventilation systems. Pp. 74–77.

Igor Olegovich Rogal, postgraduate student; **Artem Alexandrovich Nosovets**, postgraduate student; **Muhammad Naveed**, postgraduate student; **Yulia Nikolaevna Kropis**, postgraduate student; **Andrey Alekseevich Nikitin**, PhD (Engineering), Associate Professor, "Energy-Efficient Engineering Systems" Educational Center, ITMO University.

1. SP 60.13330.2020 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 60.13330.2020]. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh (Peresmotr SP 60.13330.2016 "SNiP 41-01-2003") (s Popr., s Izm. №1–6)* [Heating, ventilation, and air conditioning {Revision of The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 60.13330.2016 "The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-01-2003"} (with Amendment, with Amendments Nos. 1–6)]. Date of impl.: July 1, 2021. [In Russian]
2. W. Huang, Y. Lin, B. Lin, L. Zhao. Modeling and predicting the occupancy in a China hub airport terminal using Wi-Fi data. *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 203. Art. 109439.
3. X. Dai, J. Liu, X. Zhang. A review of studies applying machine learning models to predict occupancy and window-opening behaviours in smart buildings. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 223. Art. 110159.
4. I.O. Rogal, A.A. Nikitin, S.S. Muravejnikov, Yu.N. Kropis, V.A. Nikitina. *Otsenka parametrov vnutrennego vozdukh (CO₂, temperatura, vlazhnost') kak indikatorov zapolnyaemosti pomeshcheniya lyud'mi* [Assessment of indoor air parameters (CO₂, temperature, humidity) as indicators of room occupancy]. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda* [Bulletin of the International Academy of Refrigeration]. 2026. No. 2. Pp. 3–11. [In Russian]
5. A. Mohammadabadi, S. Rahnama, A. Afshari. Indoor occupancy detection based on environmental data using CNN-XGBoost model: Experimental validation in a residential building. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 21. Art. 14644.
6. Ch. Jiang, M.K. Masood, Y.Ch. Soh, H. Li. Indoor occupancy estimation from carbon dioxide concentration. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 131. Pp. 132–141.
7. K. Aurangzeb, M. Alhussein, K. Javadi, S.I. Haider. A Pyramid-CNN based Deep Learning Model for power load forecasting of similar-profile energy customers based on clustering. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 14992–15003.



Урал-Пресс



Почта России

12 номеров в год

Подписка с любого месяца, доставка по России.

САПЛИКОВА • ОТОПЛЕНИЕ • КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ 08 16	САПЛИКОВА • ОТОПЛЕНИЕ • КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ 18 28	САПЛИКОВА • ОТОПЛЕНИЕ • КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ 12 36	САПЛИКОВА • ОТОПЛЕНИЕ • КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ 16 20
ИНВЕРТОРНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ для быстрого монтажа, простоты и уверенных продаж	МОНОЛИТНЫЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ РАДИАТОР самый прочный в мире без стыков и радиаторов без трещин капитал 100% САДЕАНО В РОССИИ	СИЛА В КАЖДОМ ХОМУТЕ! 1-2 45 000 10 000 Сертифицированный центр Независимый центр Партнерский центр Автоматический центр Вся продукция сертифицирована	ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ХОЛОДИЛЬНОЕ И КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ Серии до 1,5 кВт челюсти • преобразователи конденсаторов водоносные конденсаторы • системы радиации Решения с колорными интеллект